

植生周辺の組織渦の解明および河道設計への応用

第1章 研究の概要

第2章 画像処理流速計の開発

2. 1 計測の原理と装置

2. 2 計測法

第3章 表面噴流の計測

3. 1 実験装置

3. 2 計測結果と考察

3. 3 まとめ

第4章 植生を有するワンド周辺の流れの特性

4. 1 実験の目的

4. 2 実験装置と実験条件

4. 3 水平面での時間平均流速分布と考察

4. 4 まとめ

第5章 植生を有する複断面水路の非定常流の特性

5. 1 実験の目的

5. 2 実験装置と実験条件

5. 3 実験結果と考察

5. 4 まとめ

第6章 結論

東京大学大学院社会基盤工学専攻 玉井信行

1. 研究の概要

本調査研究においては実験室における模擬樹木周辺の流れの解明、人工ワンド周辺の流れの計測、数値解析法の汎用化と並行して、流れの微細構造を面的に捉えることのできる画像処理流速計の開発を行った。基礎的な研究では、ビデオカメラによる撮影に関するカメラの軸線、フィルム位置、焦点距離の較正係数の検定などを行った。さらに、2台のビデオを用いた立体的な粒子追跡法に関して、トレーサー粒子の大きさの影響、連続する画面での粒子の対応付けの規準を定め、流速場を連続的に算出できるシステムとした。それを噴流計測に適用し基本的な性能が得られていることを確認した。

人工ワンドを含む河道において高水敷と低水路の境界部に生えている樹木がよく見られるが、この部分での流れが洪水の時にどのような特性を呈するかはほとんど不明である。本研究では植生およびワンドを有する流れの実験を行ない、詳細な速度分布、水深分布を計測した。ワンド内の水位は周辺部より低く、ワンド内に流入する流れが卓越し、土砂を堆積させる可能性が高い。平均流速および乱れ強度の分布は、高水敷上の植生により大きく影響を受けることが分かった。しかし、ワンド開口部に配置した植生は、流れに大きな影響を与えない。

洪水を模擬した非定常流の実験を高水敷の植生が存在する複断面河道に対して行った。低水路と高水敷での流速差はより大きくなり、境界部付近では洪水期間中にわたり水深が小さくなることが分かった。低水路での主流方向の流速の変化を増水期と減水期で比較し、水深との関係を論じた。横断方向の流速についても増水期と減水期での特徴が明らかになった。

2. 画像処理流速計の開発

2-1 計測の原理と装置

本計測の原理は、流れ場の中に投入したトレーサ粒子を2台のカメラを用いて撮影し、得られた粒子画像から各トレーサーの位置を求め、これをラグランジュ的に追跡することにより局所の流速を求めるというものである。

本システムは、2台のTVカメラ（NEC, TI-24P）、画像処理装置（PIAS, PIAS III：画素数480×512, 輝度256階調）、ビデオデッキ（Panasonic, AG-7355）、照明、ビデオタイマー（FOR・A, VTG-33）、同期装置（日本事務機器, TSC-30）及び32ビットコンピュータ（NEC, PC9801FA）で構成されており、他の同様のシステムと比較して簡略化された機器で構成されている。

トレーサ粒子の運動は、異なる方向から2台のTVカメラで同時に撮影される。画像を録画するときに、同期装置により同期されたビデオタイマーの示す時間を画像に写しこんでおき、後で2枚の同時刻

の画像を対応付けるのに利用する。実験終了後、画像処理装置を用いてビデオデッキをリモートコントロールし、ある時間間隔ごとに、画像の取り込み、2値化・反転などの画像処理、重心の写真座標計算、得られた画像計測データのディスクへの保存といった手続きを繰り返す。これらの手続きはソフトにより自動的に行うことができ、処理の効率化が図られている。

2-2 計測方法

計測は『カメラ較正』と『トレーサ追跡』に大別される。『カメラ較正』では、TVカメラの位置及び視野の方向等を記述する標定要素と呼ばれるパラメータを求める。『トレーサ追跡』ではトレーサ粒子画像の撮影からその速度3成分の算出までを行う。

実験では、まず基準点画像を記録し、次にトレーサを流れ場に投入して、トレーサ画像を記録する。実験後、基準点画像から基準点写真座標を求め、あらかじめ測定した基準点の絶対座標とから、標定要素を計算する。次にトレーサ画像からトレーサ写真座標を求め、標定要素を用いてトレーサ絶対座標を計算し、トレーサの移動距離からトレーサ速度を算出する。

2.2.1 カメラの較正

標定要素の計算に必要な基準点には直径1.5mmの白色インスタントレタリングを使用し、これを較正板の上に10~20mm間隔の格子状に貼付した。較正板には裏面を黒く着色した平滑なアクリル板を使用した。較正板をYZ平面に平行になるようにトラバース装置に固定し、X軸方向に較正板を平行移動させることによって基準点を三次元的に分布させる。一方、基準点絶対座標の測定は以下のように行う。まず透明アクリル板に幅1cmの格子をえがき、トラバース装置と顕微鏡を用いて格子間隔を測定する。次に格子をえがいた透明アクリル板のうえに別の透明アクリル板を重ね、白色レタリングの中心が格子の交点と正確に一致するように顕微鏡で観察しながら貼付した。較正板の面上での二次元的座標は格子の交点の相対的な位置より求められる。較正板に直交する方向の座標(X軸)は、トラバース装置の送り量から求められるので、これらの値から測定領域内の基準点絶対座標を得ることができる。このようにして求める基準点絶対座標と写真座標とから標定要素を計算する。

トレーサの絶対座標を求めるために同一トレーサの対応付けを行う。対応付けのアルゴリズムは以下のようである。

- ① まず、2台のカメラから得た2直線のすべての組み合わせについて、2直線間の距離とその2直線間に引いた最短の線分の中点を計算する。2直線間の距離があらかじめ定めた閾値以下であり、さらに中点が観察領域内に存在するとき、その点を絶対座標の“候補点”として記憶する。またその2直線を“候補直線”とする。
- ② まず一方のカメラの一本の直線に注目し、その直線に対して候補直線が1本だけの場合、その2直線により定まる候補点を絶対座標の“決定点”とする。この操作を一方のカメラから得せるすべての直線について行い、次にもう一方のカメラについても同じ操作を行う。
- ③ 操作②によって決まった決定点を候補点のなかから除外する。

④操作②、③を新しく決定点がでなくなるまで繰り返す。

2.2.2 トレーサの空間対応付け

空間対応付けでは、多数のトレーサが写しこまれた1組の写真画像から同一トレーサを対応付け、その絶対座標を計算する。2.2.1で求めたカメラの標定要素とトレーサ写真座標を用いると、投影中心とトレーサ写真座標とを結ぶ直線が求まる。

2台のカメラからそれぞれ1本ずつ直線を引くことができ、未知点の座標はその2直線の交点として求めることができる。しかし、実際には様々な誤差によって2直線は一点では交わらない。本研究では2直線間の最短距離がある閾値以下のときその2直線は交わると判断し、2直線間に引いた最短の線分の中点を未知点の座標とした。

2.2.3 トレーサの時間対応付け

流れ場の流速を知るためには、隣接する時刻に取り込まれた写真画像で同一トレーサを対応付けることが必要である。時間対応付けでは、2.2.1で得られた各時刻におけるトレーサの絶対座標を用いて、異なる時刻間での同一トレーサの対応付けを行う。多数のトレーサを流れ場に投入した場合、連続する画像間での同一トレーサの認識が困難となる。この認識を容易にするため、従来の研究においては、トレーサ画像の輝度や大きさの情報の利用、3時刻以上にわたる画像上でのトレーサの二次元的追跡、連続する2組のフレームセットを用いて、計4時刻にわたりトレーサを三次元的に追跡することが行われている。本研究では、乱流場への適用をある程度意図して、4時刻間の追跡によってトレーサ粒子の軌跡を求める方法を用いた。図2.1に4時刻間の追跡の概念図を示す（実際の追跡は三次元である）。図

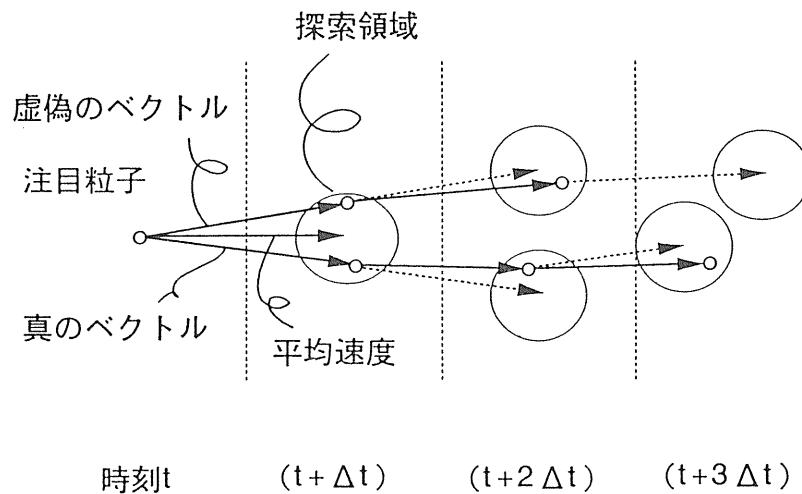


図2.1 4時刻間追跡の概念図

中には時刻 t から時間間隔 Δt で連続する4時刻のトレーサ位置を示している。時刻 t におけるトレーサ粒子（座標 P_i ($i = 1, 2, 3$)）に注目し、このトレーサ位置での平均速度ベクトルが U_i であるとき、時刻 $(t + \Delta t)$ でのこのトレーサの推定位置 $Q_i(t + \Delta t)$ は、以下の式で与えられる。

$$Q_i(t + \Delta t) = P_i(t) + U_i(\Delta t) \quad (2.1)$$

そして、この推定位置のまわりに± r_2 , i だけの探索領域、すなわち、

$$Q_i(t + \Delta t) - r_2, i < x_i < Q_i(t + \Delta t) + r_2, i \quad (2.2)$$

を設け、その中に存在する時刻 ($t + \Delta t$) でのトレーサ粒子を検索し、見つかったトレーサの位置 $P_i(t + \Delta t)$ との間に 2 時刻間の軌跡の候補を立てる。次に、

$$Q_i(t + 2\Delta t) = 2P_i(t + \Delta t) - P_i(t) \quad (2.3)$$

から、時刻 ($t + 2\Delta t$) における推定位置を求め、同様に± r_3 , i だけの探索領域の中に存在するトレーサ粒子を検索する。さらに見つかったトレーサ位置 $P_i(t + 2\Delta t)$ を用いて 4 番目の時刻 ($t + 3\Delta t$) における位置を

$$Q_i(t + 3\Delta t) = (k+2)P_i(t + 2\Delta t) - (2k+1)P_i(t + \Delta t) + kP_i(t), 0 < k < 1 \quad (2.4)$$

により推定する。そして、この推定位置を中心とする± r_4 , i の探索領域の中にトレーサ粒子が存在し、かつ時刻 t と時刻 ($t + \Delta t$) の間の軌跡が他の軌跡と独立であるときに、時刻 t と時刻 Δt の間のこの軌跡を真と判定する。最終的に、速度ベクトル v_i 、及びその空間位置 y_i は、それぞれ、

$$v_i = \{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)\} / \Delta t \quad (2.5)$$

$$y_i = \{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)\} / 2 \quad (2.6)$$

により与えられる。

本手法では、流れ場の平均速度分布などがあらかじめ予測できる場合には、この既知情報をトレーサ粒子の時間対応付けに利用する。一方、そのような情報が得られない場合には、まず投入粒子数を十分減らした測定を行い、平均速度分布を求め、それを既知情報として、以後投入粒子数を増やした測定を利用する。

3. 表面噴流の計測

3-1 実験装置

実験装置の全体図と座標系を図 3.1 に示す。水路は、本学科 1 号館地下室にあるアクリル製のトライングタンクを用いた。この水路は内部の水深が 0.8m、幅 0.5m、長さ 7 m である。水路全長にわたって水路の内部の壁から 0.17m のところに仕切り板を設け、仕切り板で区切られた水路の一方には水が浸入しないようにした。実験に先立って、水路とポンプのある小さい水槽に水をためる。その後、観察領域の内壁や観察窓についた気泡を取り除いておく。ポンプを作動させて、水を上流端のタンクに送り、バルブの絞りを調節して一定量の水を流し、上流端から 1 m の整流板を通した後、上流端から 2 m の固定堰を越流させて噴流を発生させる。上流端から 6 m の所にも可動堰があり、その高さを上下させることによって、水路内部の水深を一定に保つことができる。下流端からあぶれた水は、一旦小さい水槽に流入させ、再びポンプで上流端のタンクに循環させる。

次に、三次元流速測定における観察領域周辺の詳細図を図 3.2 に示す。固定堰から 0.3~0.9m の部分の仕切板は着脱可能な構造で、CCD カメラ位置に 2 つ観察窓をつけた透明アクリル板を装着すること

ができる。この観察窓は水平方向に同じ位置に開けており、流れ場の観察領域をほぼ水平方向から観察するようになっている。透明アクリル板を装着したとき、観察窓の位置は $y = 0.5\text{m}$ 、 0.8m であり、 $z = 0.05\text{m}$ 、 0.15m の 2 種類のうち観察領域の違いによりいずれかを選択する。観察窓は透明アクリル製の円筒でカメラ本体の長さと 2 台のカメラに角度をつける目的で、水路に約 5 cm 突き出ており、CCD カメラの先端を密着させて得られる画像の歪みを防いだ。観察窓による流れの乱れを防ぐために $X = -0.28\text{m}$ 、 $y = 0.3\sim 0.9\text{m}$ の範囲に厚さ 2 mm の透明アクリル板をつけた。水路の上部には最小目盛 10 μm のトラバース装置が固定されており、カメラ較正時にはこれに校正板を取りつけたアームを固定して、 x 方向にトラバースし、基準点撮影を行う。

水路底面には移動可能な長さ 10 cm、幅 5 cm のスリットがあり、下部からの照明光を通過させる。通過した光は水路底面におかれたレンズで散乱を防ぐ。観察領域は一辺が 50 mm の立方体となる。この中に入ったトレーサ粒子は照明光を反射して白く光り、画像として各カメラに取り込まれる。画像処理のさいに二値化を容易にするため、 $0 \leq y \leq 1\text{ m}$ の部分は光を反射しないように水路全体を黒いビニールシートで覆った。

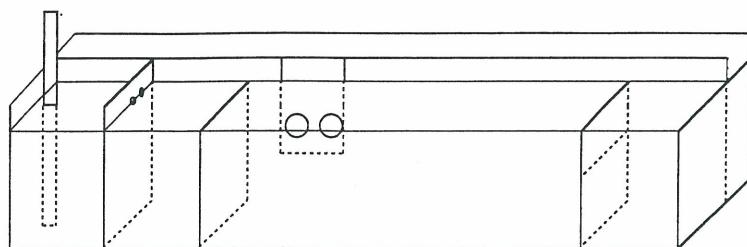


図 3.1 実験装置

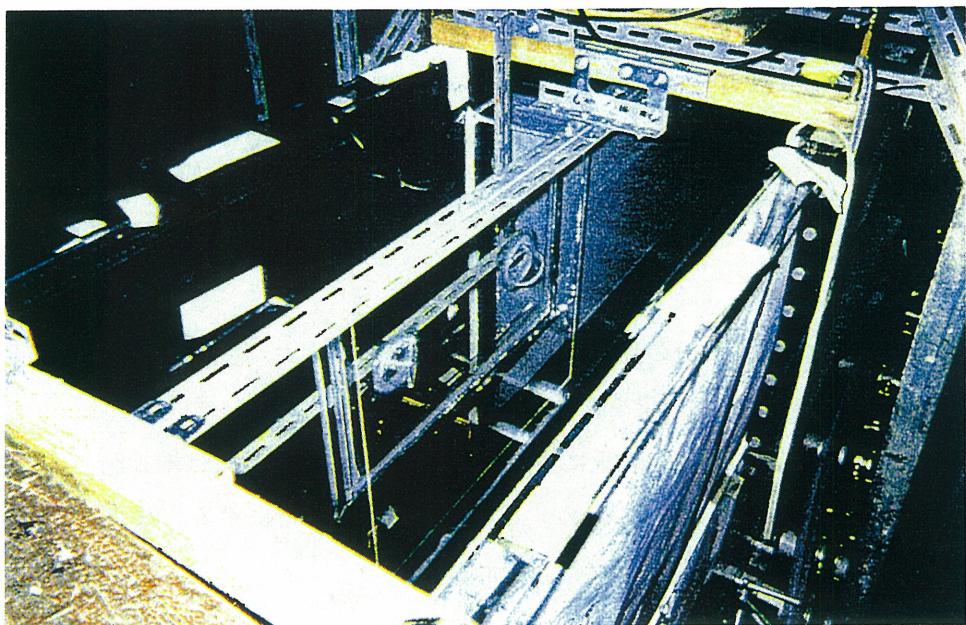


図 3.2 観察領域周辺の詳細図

3 - 2 計測結果と考察

3.2.1 平均速度 y 成分の分布

ベクトル数が 6 点以上の格子における平均速度 y 成分の分布を図 3.3 に示す。最大平均速度は画像処理流速計を用いての測定は行っていないので、I 型電磁流速計による計測結果を利用した。測定した領域が小さいために水深方向全体を通しての比較を行うことは困難であるが、傾向としては熱膜流速計による計測結果と一致する。また、同一の水路で測定した I 型電磁流速計による計測結果は、三次元画像処理流速計による計測結果よりも大きな速度変動がみられる。このことより、三次元画像処理流速計は平均流速の計測において、十分な精度をもつといえる。図 3.3 において、

$$z/b(70) \geq 2$$

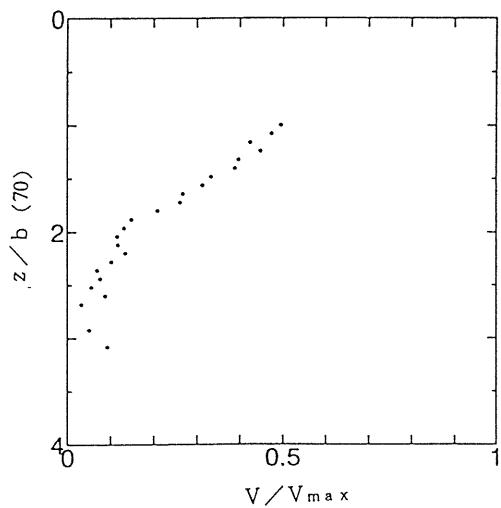


図 3.3 平均速度 y 成分の分布

では、水深方向にある程度のばらつきが見られる。これは、画像処理流速計のトレーサ粒子の測定誤差は、速度に関係なく一定であることから、小さな速度に対して誤差が相対的に大きくなつたためと考えられる。

3.2.2 亂れ成分の分布

本計測で得られた速度変動 3 成分の乱れ成分を図 3.4(a)~(c)に示す。比較データとして T. F. Swean Jr. et al. による熱膜流速計による実験結果を図 3.5(a)~(c)に示した。

まず、T. F. Swean Jr. et al. による結果について特徴を把握する。考察は本計測では U による値が $1 \leq z/b(70) \leq 3$ にのみ分布しているため、この範囲に限ることにする。なお、 $z/b(70)$ は、図 3.5 の記号では、* と 5 が本計測の条件に近似する。

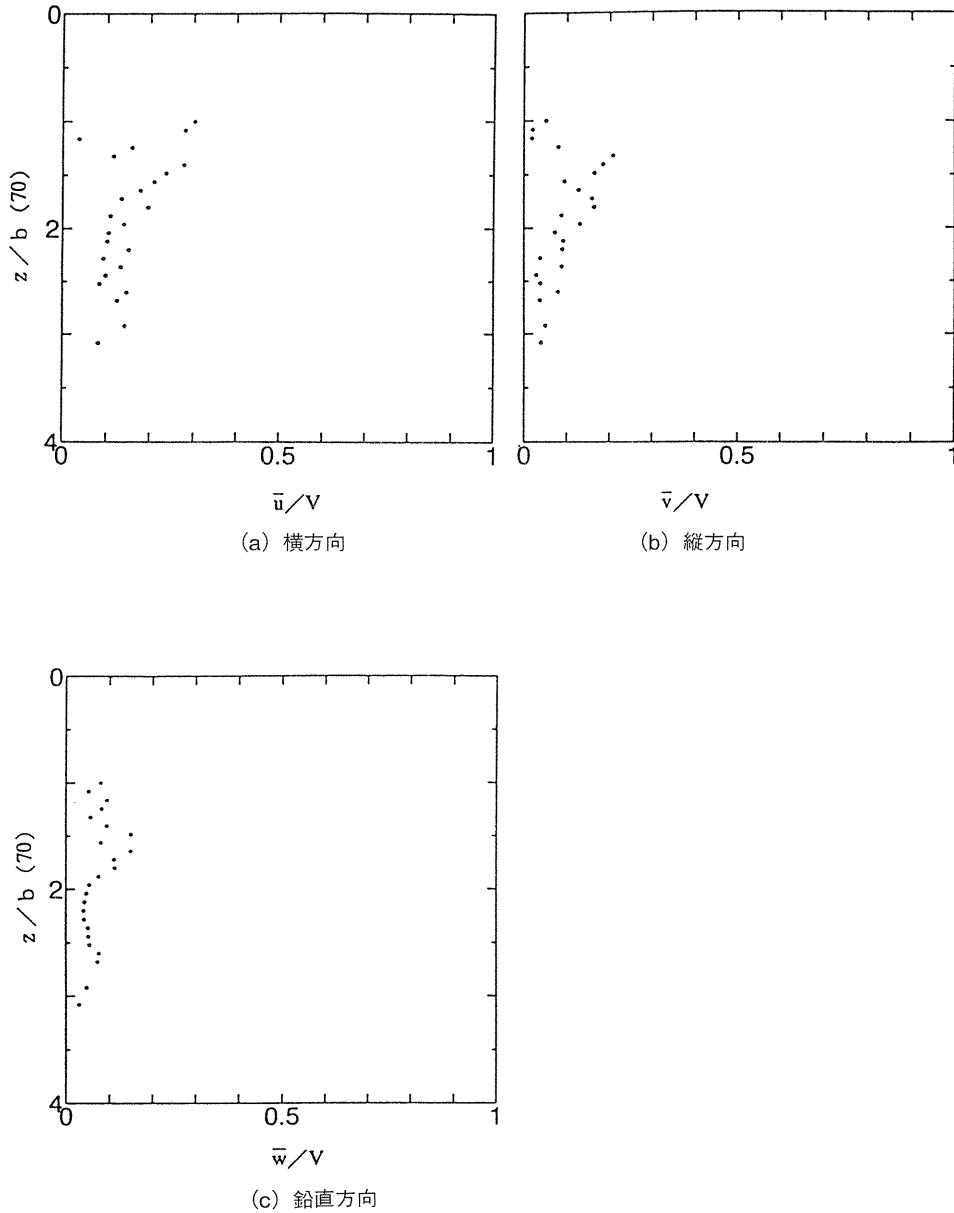


図 3.4 速度変動 3 成分の分布（本実験）

\bar{u} 成分 $\cdots z/b(z) = 1$ で最大値 0.13、 $z/b(z) = 2.5$ でほぼ 0 になる。

\bar{v} 成分 $\cdots z/b(z) = 1$ で最大値 0.17、 $z/b(z) = 3$ でほぼ 0 になる。

\bar{w} 成分 $\cdots z/b(z) = 1$ で最大値 0.12、 $z/b(z) = 2.5$ でほぼ 0 になる。

次に本計測による結果について考察する。本計測においてはいずれも $z/b(70) \geq 2$ で極小値を取るが、その値は \bar{v} 、 \bar{w} 成分で 0.05 程度、 \bar{u} 成分では 0.1 程度とやや大きめの値を示す。 $z/b(70) \leq 2$ では、格子点によって、非常に大きく変動を示しており、その傾向をつかむのは困難である。 \bar{u} 、 \bar{v} は右上方向の傾向が見られるのに対して、 \bar{w} は 0.1 程度で推移する傾向をもっている。図 3.5 に比べ、図 3.4 の結果がこのようにばらついている原因として、1 格子点あたりのベクトル数が約 30 と、統計量を算出するのに十分なサンプル数が得られておらず、少ない数のベクトルによる局所的な流速が、乱れ成分に

影響を及ぼしたためと考えられる。

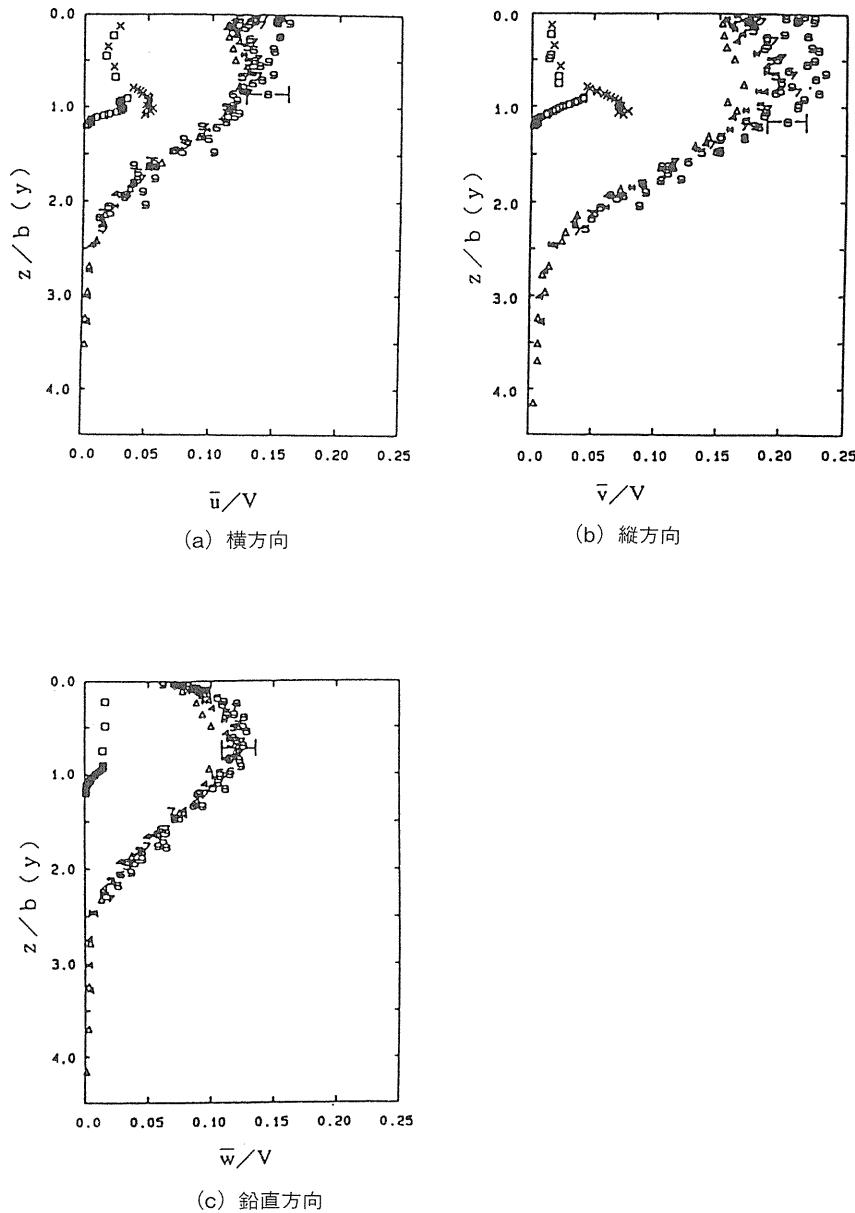


図 3.5 速度変動 3 成分の分布 (Swean Jr. et al.)

3-3 まとめ

本章では、トeingタンクを用いて、表面噴流を発生させ、I型二成分電磁流速計と画像処理流速計を用いて、順流と逆流が混在した境界層周辺の計測を行った。

これにより次のことが明らかとなった。

- 1 フレームにつき得られた瞬時速度ベクトルは平均2.3個であり、速度三成分の三次元分布を再現するには至らなかった。実験の際、カメラ配置の工夫により、重複するトレーサ粒子をできるだけ少なくすること、照明の配置にさらに工夫を施して良好な原画像を得ること、瞬時速度ベクトル数を最も

多く得られるようなトレーサ粒子の密度を探ることに工夫の余地が残されている。

- しかし、平均速度は従来の熱膜流速計による計測結果と良い一致を示し、I型電磁流速計による計測よりも良好な結果が得られた。平均速度については、実用に十分耐えうる測定精度をもつといえる。
- 統計量を算出するためには、1格子につき大量の瞬時速度ベクトルが得られることが望ましく、今回は瞬時速度ベクトル数の不足から、本システムにおける乱れ成分についての測定精度を考察することはできなかった。

結論をふまえて、今後本計測手法の開発を継続していく際の課題を挙げる。

1. 測定精度の向上

信頼性の高い計測結果を得るために、より一層の測定精度の向上が求められる。トレーサ粒子の絶対座標の不確かさが小さくなると、瞬時速度ベクトルの速度3成分の誤差が小さくなるばかりでなく、絶対座標の算出や、時間対応付けの際の閾値を小さめに設定することが可能になり、虚偽の速度ベクトルを算出する可能性が低くなる。したがって、高いトレーサ密度で多くの瞬時速度ベクトルを得ることができることになる。第2章で行った不確かさ解析では、基準点絶対座標とトレーサ写真座標の2値化閾値に伴う不確かさが計測の不確かさに大きく寄与していることが明らかになった。基準点絶対座標の精度を高めるためには、トラバース機構付きの顕微鏡を用いて二次元的位置の測定を行うことや、較正板をとりつけたアームとトラバース装置を正確に直角に保てるよう加工することが考えられ、トレーサ写真座標の2値化閾値に伴う不確かさを少なくするための方法として、照明を工夫することにより、トレーサ粒子が鮮明に写った原画像を取得することや、画像処理の際に各画素の輝度値の重みを付けて重心位置を決定することが考えられる。

2. 処理速度の向上

第3章で行った実験では、ほとんどの手続きを自動化しているが、1フレームセットの画像処理に約1分、画像処理により得られた写真座標から瞬時速度ベクトルの算出までに約2分を要した。本計測手法は、統計計算出のために膨大なフレームセットを処理する必要があるため、これらの計算時間の短縮は大幅な効率向上につながる。ワークステーションの利用により処理速度の向上をはかる必要がある。

4. 植生を有するワンド周辺の流れの特性

4-1 実験的目的

ワンドは多様な生態系を保全する貴重な水域を提供することができる。このため、その造成が着目されているが、ワンド内での土砂堆積など維持管理上の問題点が生ずる高水時の流れについては十分には理解されていない。

ここでは、河川の複断面形状の高水敷を一部掘り込んで造成されるワンドを対象とし、高水時におい

てワンド周辺の植生が流れに及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした。そのために、模擬植生の配置と水深を変化させて、電磁流速計を使用して流速の3成分を測定した。そして、時間平均した流速分布と乱れ強度の分布にみられる特性について検討した。

4-2 実験装置と実験条件

実験で用いた水路の概要を図4-1に示す。全長25m、幅1m、側壁の高さ0.6m、水路床勾配1/2000の循環式直線水路の片側に、鉄板製の高さ5cm、幅60cmの高水敷を設けて、複断面水路を作製した。水路上流端より9.6mから11.4mの測定区間では、電磁流速計の磁界を乱すことのないように、耐水ベニヤと塩化ビニール板を用いて滑らかな高水敷とした。模擬植生としては直径d=2mm、長さl=3.4cm、間隔2.5cmのプラスチック製のものを使用した。

実験では流速の3成分と水深とを測定した。流速の測定には東京計測社製の2成分電磁流速計SFT-2012（I型、L型プローブ）を使用した。また、水位の測定には東京計測社製の容量式波高形HA-106を使用した。

実験条件を表4-1に示す。表ではQ：流量、U：断面平均流速、H：低水路中央での水深、h：ワンド中心部の水深、 $R_e = UR/v$ 、R：径深、n：粗度係数、Fr：フルード数である。なお、すべての実験は定常流を対象とした。

CASE-1は植生のない最も単純なワンドである。CASE-2は高水敷上のみに植生帯を設けた場合、CASE-3はワンドと低水路との境界面上に植生列を設けた場合、CASE-4は高水敷上に植生帯を、ワンドの境界面に植生列を設けた場合である。CASE-1からCASE-4までは、水深がほぼ同一であり流れに及ぼす植生の影響を比較するものである。CASE-5はCASE-4の水深を大きくし、高水敷上の植生が完全に水没するようにした場合である。CASE-3、4、5での植生列は植生を2.5cm間隔で千鳥状に2列配置したものである。またCASE-2、4、5での高水敷上の植生帯も同じ模擬植生を使用し、ワンドの上流端より1m上流の地点からワンドの下流端より20cm下流の地点まで高水敷の全幅にわたって2.5cm間隔で格子状に配置した。

高水時のワンド周辺の流れ場は3次元性と剥離を伴う非定常性の強い乱流である。このため、I型とL型のプローブを使用して3成分の流速を測定した。測定した水平断面は高水敷高さより高水位で1断面、高水敷高さより低水位で2断面の計3断面である。サンプリング間隔はすべて0.1秒であり、それぞれの計測点につき1分間のサンプリングで600個のデータを得た。

4-3 水平面内の時間平均流速分布と考察

実験結果のうち水平面内の時間平均流速分布の結果を述べる。

測定した水平断面の高さを図4-2に示す。また、水平面内の時間平均流速分布を図4-3～4-7に示す。これらの図から明らかなように、ワンド内の流速分布は低水時の場合と著しく異なっており、複雑である。

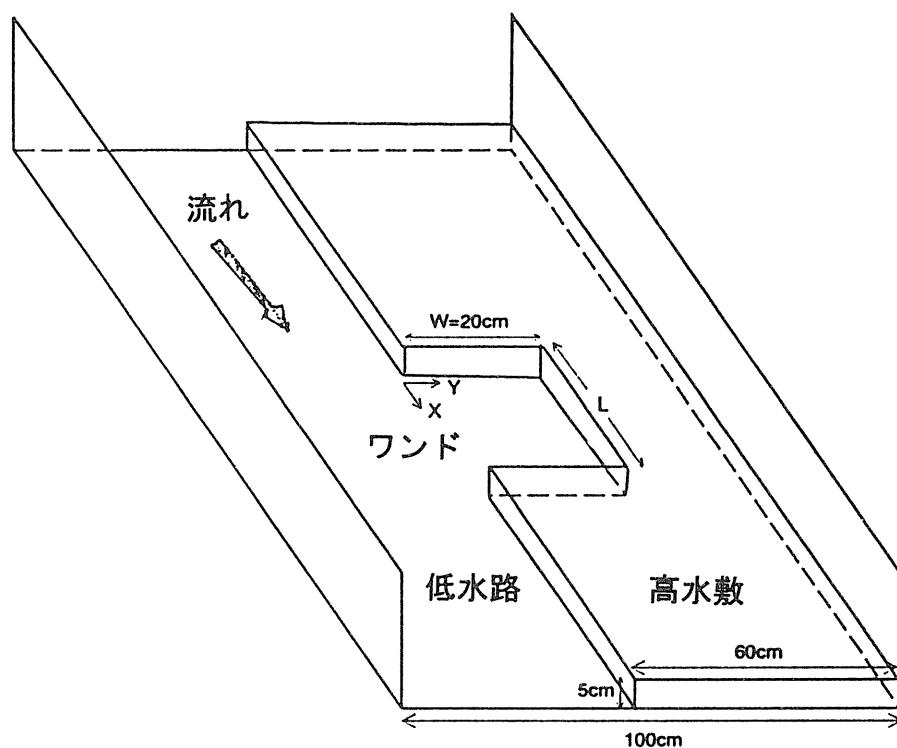
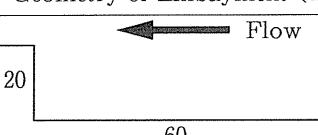
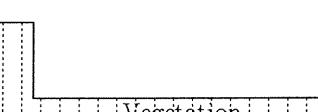
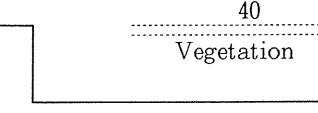
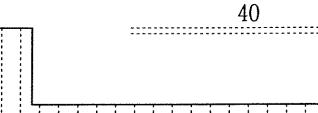
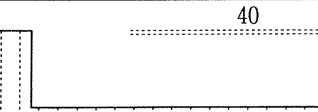


図 4-1 実験水路の概要

表 4-1 実験条件

CASU	Geometry of Embayment (cm)	$Q(\ell / S)$	$U(cm/S)$	$H(cm)$	$h(cm)$	Re	n	Fr
1	 Flow	14.46	43.09	7.75	7.80	17700	0.0133	0.68
2	 Vegetation	16.69	43.52	7.60	7.55	17400	0.0129	0.70
3	 Vegetation	16.47	44.0	7.75	7.77	17700	0.0130	0.69
4	 Vegetation	18.18	44.3	7.70	7.69	18000	0.0129	0.70
5	 Vegetation	27.03	47.3	9.37	9.39	25400	0.0145	0.65

CASE-1では、高水敷より高い水平面Z1（水路の底面より6.5cmの高さ）においてはほぼ主流と同方向の流れであり、左右からワンド内に流入するような流れが見られる。高水敷高さよりわずかに低い面Z2（底面より4cmの高さ）での流速も上流端付近を除いて主流と同方向である。最も底面に近い面Z3（底面より1cmの高さ）では、低水時に見られるような明確な循環流は見られず、ワンドの上流寄りの部分に弱い循環流が生じている。段落ち流れと横断方向のせん断流れとが組み合わさった流れが形成されている。ワンド内部の上流部では特に流速が小さく、洪水時には土砂などが堆積することが考えられる。

ワンド周辺の高水敷上に植生帯を設置したCASE-2では、面Z1において高水敷上の植生帯中からワンド内へ流入する流れが目立っており、横断方向にも水面勾配が発生していた。高水敷からワンドに斜めに流入する流れは段落ち部特有の流れ場をワンド底面付近に広く形成させ、CASE-1とは流速分布が大きく異なる。

ワンドの境界面に沿って植生列を設置したCASE-3では、植生列上の水深が周囲より大きくなることによって面Z1でワンドの入り口の境界面においてワンドから流出する方向の流れが見られる。面Z2、Z3では低水路からワンド内へ流入する流れが若干弱くなっている。CASE-1と比較すると、面Z3において上流端寄りに見られる循環流がより明確になっているものの、植生列を配置することが流れ場に与える影響は顕著ではない。

ワンド周辺の高水敷上に植生帯を設置し、さらに境界面に沿って植生列を設置したCASE-4では、流れの様子はCASE-2に類似しているが、面Z2、Z3においてCASE-2よりも流下方向の流速が大きい領域が生じている。

CASE-4と同じ形状で水深をさらに大きくし、高水敷上の植生が完全に水没している場合であるCASE-5では、当然ながらすべての断面においてCASE-4よりも流速が大きくなっている。しかし、流速分布自体はCASE-5とCASE-4とではよく似ている。

4-4 まとめ

高水時のワンド周辺の流れにして得られた主要な結果をまとめると次のようになる。

1. ワンド内の流速分布は複数の循環流が生じる3次元性と非定常性の強い流れである。
2. ワンド内の水位は周辺部よりもやや高くなり、ワンド周辺の水位は上昇する。
3. 高水敷及び主流部からワンド内へ流入する流れは、土砂を含んでいればワンド内に、特にワンド上流部の循環流部と下流部のよどみ部に土砂を堆積させる可能性が高い。
4. 平均流速及び乱れ強度の分布は高水敷上の植生の存在により大きく影響される。
5. ワンド開口部上の植生列がワンド内の流れ場に与える影響は大きくない。

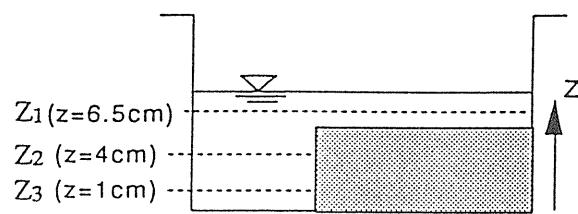


図4-2 計測水平面位置

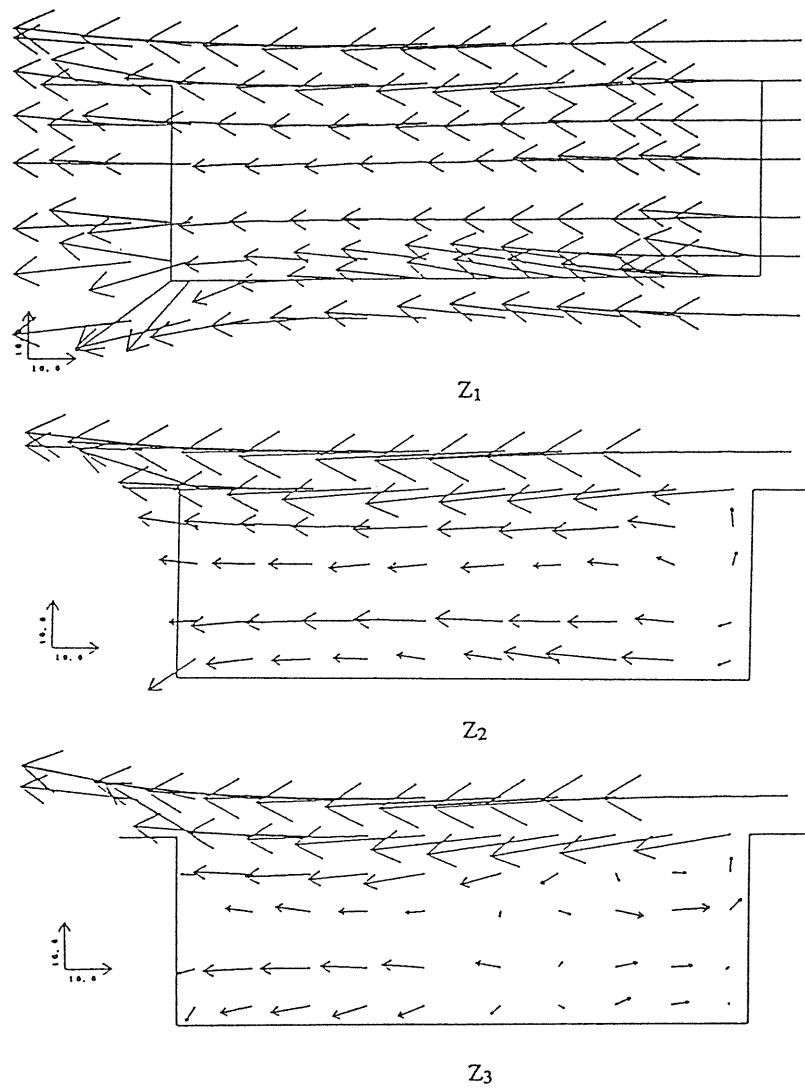


図4-3 水平面内の流速分布（CASE-1）

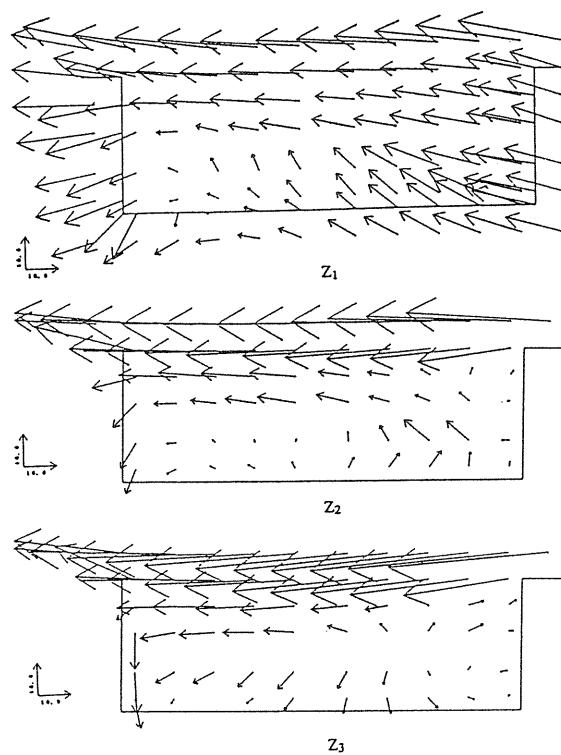


図4-4 水平面内の流速分布 (CASE-2)

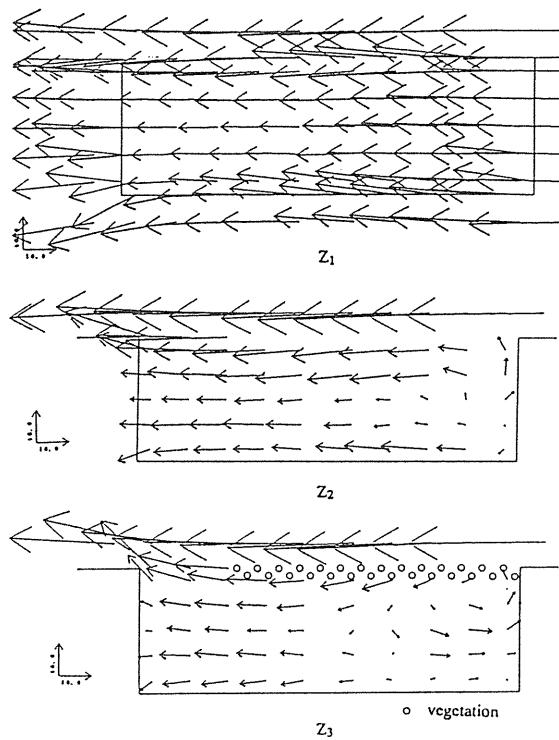


図4-5 水平面内の流速分布 (CASE-3)

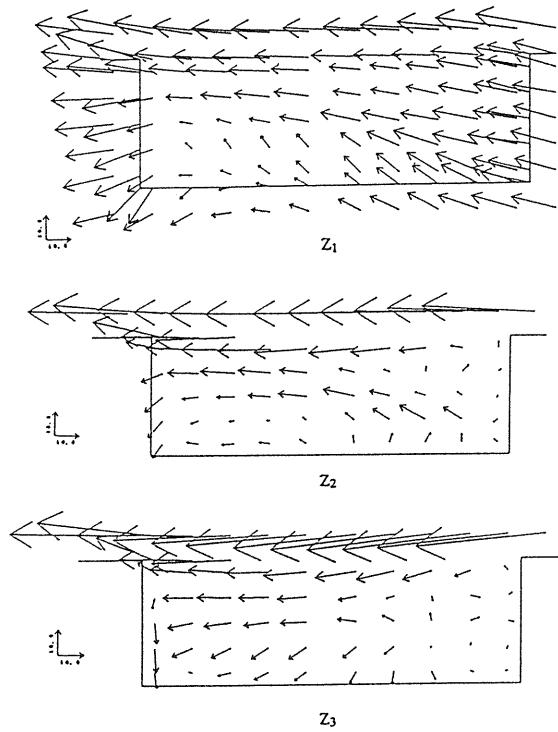


図4-6 水平面内の流速分布 (CASE-4)

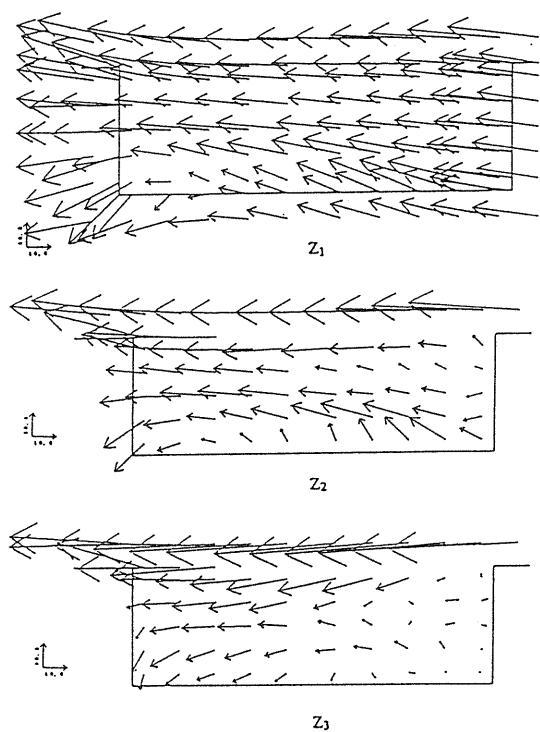


図4-7 水平面内の流速分布 (CASE-5)

5. 植生を有する複断面水路の非定常流の特性

5-1 実験の目的

我が国の河道の多くは複断面形状を有する。高水敷には植生が繁茂することが多く、高水時の流れの抵抗が増加したり、洪水流の貯留効果が変化することなど懸念される。しかし、植生を有する複断面河道における非定常流の研究例は極めて少なく、今後、研究が一層進められる必要がある。

ここでは、高水敷に植生を有する水路における非定常流の特性を明らかにすることを目的としている。そのために、非定常流を多数回発生させ、流速2成分と水深の時間的変化を詳細に測定した。

5-2 実験装置と実験条件

実験で用いた水路は第4章の図4-1に示すものとほぼ同一である。すなわち、全長25m、幅1m、側壁の高さ0.6m、水路床勾配1/2000の滑面直線水路の片側に、高さ5cm、幅60cmの高水敷を設けた。模擬植生としては直径2mm、高さ5.0cmの竹ひごを用い、厚さ1.45cmの耐水ベニヤ板に間隔2.5cmの正方格子状に植え付け、高水敷上に重ねた。横断面形状を図5-1に示す。z軸は幅方向であり、z軸の値が0から60cmまでは高水敷を、60cmから100cmまでは低水路を表す。観測は上流から12m下流の位置で行われた。

実験では流速2成分（主流成分と幅方向成分）と水深とを測定した。計測に使用した機器も第4章のものと同じである。

使用した水路に流入する流量の波形はパソコンから与えることができる。本研究では、1山のピークを持つハイドログラフを与えた。図5-2に観測断面における水深の時間的変化の計測結果を示す。これは高水敷上の2点と低水路内の2点での測定結果である。この1つのハイドログラフについて1箇所での測定を行う。終了後、流速計を次の測定位置に移動させ、再度同じハイドログラフを発生させ計測を行う。このようにして、同じ時刻での流速や水深の空間的な分布を取得した。

5-3 実験結果と考察

5.3.1 水深分布と時間的変化

図5-3に植生のある場合と無い場合における低水路内の水深の時間的変化を示している。図より植生が水深のピーク時を遅らせることが明らかである。また、図には示さないが、高水敷上の水深のピークは低水路内の水深のピークより僅かに遅れることが観測されている。

図5-4は様々な時刻における水位の横断方向の分布を表している。Z=60cmあたりの低水路と高水敷との境界部付近では洪水の増水期、減水期ともに水深が小さくなっている。定常流においても境界部では大規模な水面渦が形成され、水位が僅かに低下することが知られているが、ここでも同様な現象が生起しているものと推測される。

5.3.2 流速分布と時間的変化

$Z = 65\text{cm}$ 、 80cm 、 95cm における流下方向と横断方向の流速の鉛直分布を図5-5に示す。境界部に位置する $Z = 65\text{cm}$ での主流速度 u は、低水路中央の $Z = 80\text{cm}$ や低水路側壁に近い $Z = 95\text{cm}$ での値に比較して小さい。これは、植生の存在により減速した流体が水路幅方向に輸送され、低水路内の流れを減速するためである。また、 $Z = 65\text{cm}$ における幅方向の流速 w （正の符号は高水敷に向かうことを示す）は、高水敷高さより低い範囲では高水敷に向かっている。 $Z = 80\text{cm}$ や $Z = 95\text{cm}$ の位置では流速 w の大きさは小さいが、 $Z = 80\text{cm}$ の高水敷高さ以上の範囲では、時間にかかわらず、高水敷から低水路に向かう方向に流れが生じている。このような流速 w の分布は定性的には複断面直線水路特有な二次流の存在を示唆している。

増水期と減水期における流速成分 u 、 w の横断方向の分布を示したもののが図5-6である。計測高さは $Y = 7\text{cm}$ （低水路床より 7cm の高さ）である。図より明らかなように、主流速度 u は低水路側から境界部に近づくにつれて急激に減少する。また、高水敷上の流速は植生の抵抗を受けて著しく低下している。一方、時間的な変化に着目すると、水深が同じであれば、高水敷上の流速は増水期と減水期とでは僅かにしか変化しないが、低水路内では増水期の方が大きな流速を示している。これらの現象は主として水面勾配と植生による付加抵抗により説明される。幅方向の流速 w は境界部付近では増水期に正の値を示し、流れが低水路から高水敷へと向かっていることを示している。反対に減水期ではその逆方向の流れの存在を示している。

5-4 まとめ

高水敷に植生を有する水路における非定常流の特性について、実験より得られた主な結果をまとめると次のようになる。

1. 低水路と高水敷での流速差は大きく、境界部付近では洪水期間中にわたり水深が小さくなる。これは、大規模な渦が形成されるためであると推測される。
2. 主流方向の流速は、植生部の遅い速度の流体を低水路内に輸送するため、境界部にて顕著に減速される。このため低水路内の流速分布は一層複雑となる。
3. 低水路内の主流方向の流速は、同じ水深に対して増水期では大きく、減水期では小さく。一方、植生を有する高水敷での流速にはそれらの差異が少ない。これは水面勾配と植生の抵抗とで説明できる。
4. 幅方向の流速は境界部付近では、増水期に高水敷側へ、減水期に低水路側へと向かう。しかし、境界から離れた低水路内では、定常流にみられる二次流と同様な二次流が存在していることが示唆された。

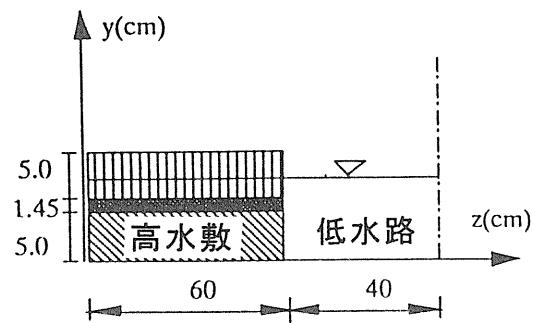


図 5－1 実験水路の横断面形状

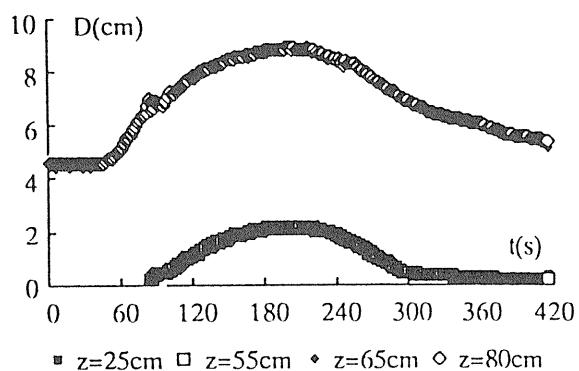


図 5－2 観測断面での水深の時間的変化

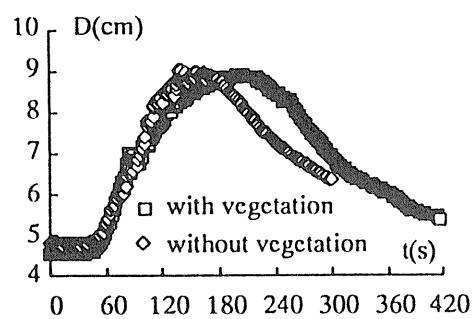


図 5－3 植生の有無による水深の時間的変化の差異

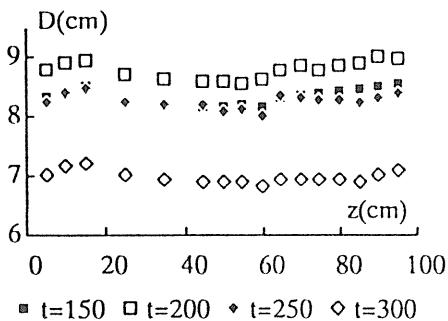


図 5－4 水位の横断方向の分布

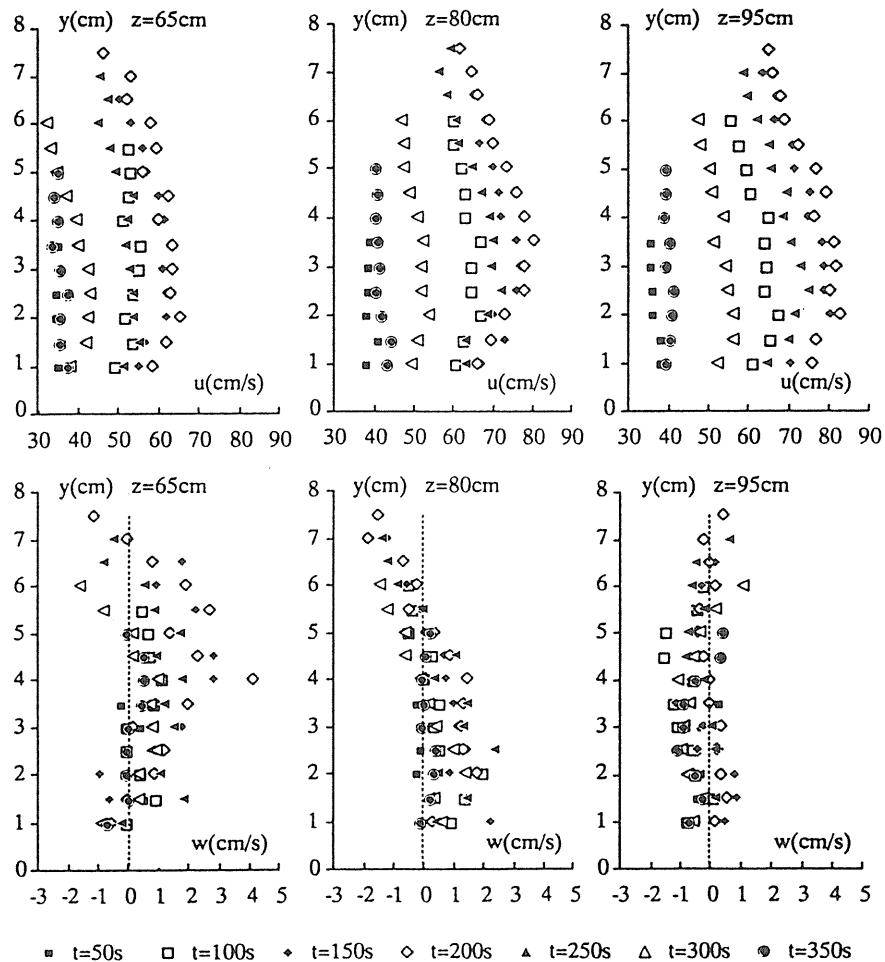


図5-5 流速の鉛直方向分布と時間的変化
(流速 w の正の符号は高水敷へ向かう流れを示す。)

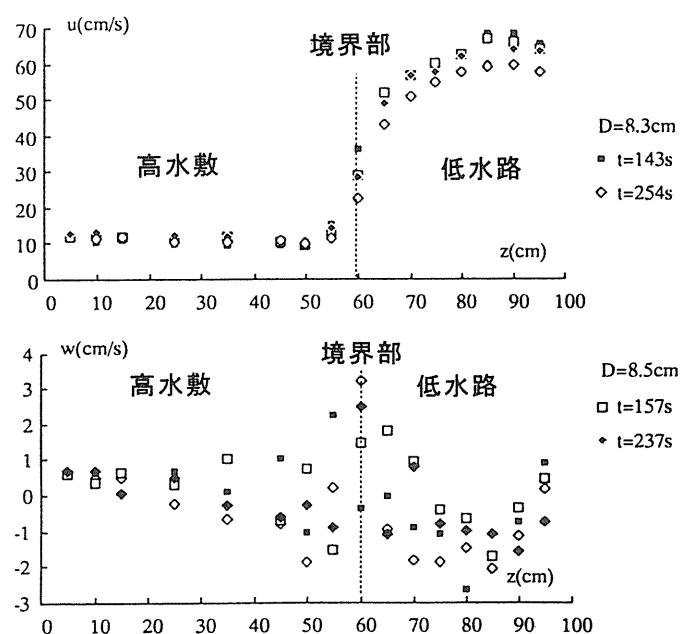


図5-6 流速の横断方向分布と時間的変化

6 結 論

本調査研究においては実験室における模擬樹木周辺の流れの解明、人工ワンド周辺の流れの計測と併行して、流れの微細構造を面的に捉えることのできる画像処理流速計の開発を行い、以下の知見を得た。

(1) 画像処理流速計の開発と検証

- 1) 2台のビデオを用いた立体的な粒子追跡法に関して流速場を連続的に算出できるシステムを組み立てた。
- 2) 本システムを自由水面噴流に適用した結果、平均速度は従来の熱膜流速計による計測結果と良い一致を示した。しかし、利用できる瞬時ベクトル数が不足し、乱流統計量の精度を確保することはできなかった。3台のカメラの使用が必要である。

(2) 植生を有するワンド周辺の高水時の流れの特性

- 3) ワンド内の流れは複数の循環流を有し、3次元性と非定常性の強い流れである。
- 4) ワンド内の水位は上下流よりやや高く、周辺部の水位を上昇させる。
- 5) 平均流速及び乱れ強度の分布は高水敷上の植生の存在により大きく影響される。
- 6) ワンド開口部上の植生列が高水時のワンド内の流れ場に与える影響は大きくない。

(3) 高水敷に植生を有する水路における非定常流の特性

- 1) 低水路と高水敷での流速差は大きく、境界部付近では洪水期間中にわたり水深が小さくなる。
- 2) 主流方向の流速は、植生部の遅い速度の流体を低水路内に輸送するため、境界部にて顕著に減速される。このため低水路内の流速分布は一層複雑となる。
- 3) 低水路内の主流方向の流速は、同じ水深に対して増水期では大きく、減水期では小さい。一方、植生を有する高水敷上での流速にはそれらの差異が少ない。